

ISSN 1564-4189

S E R I E

MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Desarrollo de una función agroclimática para estimar la productividad de los cultivos agrícolas en Colombia



CEPAL



MINISTRY OF FOREIGN
AFFAIRS OF DENMARK



MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Desarrollo de una función agroclimática para estimar la productividad de los cultivos agrícolas en Colombia



Este documento fue preparado por J. Francisco Boshell V., consultor de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y forma parte de los estudios sectoriales realizados en el marco de las actividades del proyecto CEPAL/Estudio regional de la economía del cambio climático (ERECC) en América Latina y el Caribe. El Estudio regional de la economía del cambio climático (ERECC) es coordinado en la CEPAL por Joseluis Samaniego, Carlos de Miguel, Luis Miguel Galindo y Karina Martínez y contó con el apoyo y la colaboración financiera de diversas entidades, como los Gobiernos del Reino Unido, de España, de Dinamarca y de Alemania y la Unión Europea y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Se agradece la colaboración de Andrés J. Peña Q. y sus valiosos aportes al documento.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la organización.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas

ISSN 1564-4189

LC/L.3586

Copyright © Naciones Unidas, marzo de 2013. Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile

Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Sólo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

Índice

Resumen	5
Introducción	7
I. Bases conceptuales del modelo desarrollado	9
A. Pérdidas de rendimiento por efecto del déficit hídrico según CropWat	9
B. La producción primaria neta como función de la transpiración en AquaCrop.....	10
C. La radiación neta (Rn) como motor del movimiento de agua en la planta.....	12
D. El efecto de la temperatura sobre las especies vegetales	12
II. Información y metodología utilizada	13
A. Información climática	13
B. Información agrícola	14
C. Generación de datos de radiación solar.....	14
D. Generación de evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración actual (ET _a).....	14
E. Generación del tiempo fisiológico	15
III. Calibración de la ecuación para determinar rendimientos actuales de maíz y papa	17
IV. Resultados	19
A. Modelo predictivo para maíz.....	20
B. Modelo predictivo para papa	21
V. Conclusiones	23
VI. Bibliografía	25
Serie Medio Ambiente y Desarrollo: números publicados	27

Índice de cuadros

Cuadro 1	Municipios seleccionados para el análisis	13
Cuadro 2	Datos de rendimientos reales e índices calculados para cada periodo	19
Cuadro 3	Análisis de Varianza con la ecuación (12)	21
Cuadro 4	Análisis de Varianza con la ecuación (13)	21

Índice de gráficos

Gráfico 1	Relación entre índice de área foliar, evaporación y transpiración	11
Gráfico 2	Diagrama de flujo de los componentes suelo – clima – planta, modelados en Aquacrop.....	11
Gráfico 3	Relación entre los datos reales y los generados con la ecuación (12)	20
Gráfico 4	Relación entre los datos reales y los generados con la ecuación (13)	21

Resumen

El objetivo de este trabajo fue la definición de una función de relación entre las condiciones agroclimáticas y los rendimientos agrícolas, que se pueda incorporar dentro del modelo general de simulación del impacto económico del cambio climático, que está desarrollando el Departamento Nacional de Planeación (DNP). En este documento se presenta la metodología utilizada y la función desarrollada, la cual está basada en los principios conceptuales del modelo AquaCrop 3.0 (FAO, 2009), en la función de pérdida de rendimiento desarrollada en el modelo CropWat 8.0 (FAO, 2007), en un parámetro energético descrito por la Radiación neta (R_n) y en otro relacionado con la temperatura y su influencia sobre la longitud del ciclo de cultivo (Grados día).

El trabajo realizado en la consultoría permitió establecer una función empírica que explica de modo aceptable y significativo desde un punto de vista estadístico, la productividad agrícola semestral de cultivos transitorios como el maíz y la papa en regiones productoras del país, a partir de variables agroclimáticas como la transpiración actual, la radiación neta y los grados día. Los pasos siguientes que se realizarán dentro del ERECC, corresponden a la calibración de dicha función en otros cultivos temporales y permanentes, importantes en el contexto socioeconómico nacional, y la inserción de dicha función en el modelo de equilibrio general computable, para la simulación del impacto económico del cambio climático en el país.

Introducción

Un modelo es una representación o abstracción, por lo general matemática, de un sistema real (Montoya y otros, 2009; Steduto y otros, 2009). La capacidad de procesamiento de los computadores actuales ha permitido que el conocimiento de la relación clima-suelo-planta, acumulado durante años de investigación, pueda ser plasmado en modelos dinámicos (explicativos) que simulan el crecimiento y la producción de los cultivos (Montoya y otros, 2009).

Aunque en la actualidad se encuentran disponibles un gran número de modelos de simulación de desarrollo y rendimiento agrícola, en Colombia su uso está restringido a algunos investigadores que los utilizan básicamente con fines académicos. La razón es que éstos necesitan ser alimentados y calibrados con datos que no están fácilmente disponibles para los diversos rangos de cultivos y lugares alrededor del mundo (Steduto y otros, 2009).

Para el presente caso se planteó el desarrollo de un modelo de tipo empírico que permitiera estimar de modo relativamente sencillo los efectos de la variabilidad y el cambio climático en la productividad agrícola nacional y de este modo facilitara el adecuado análisis de esta relación dentro del modelo general de simulación del impacto económico del cambio climático en Colombia, que está implementando el DNP.

En el trabajo se tomó como base para predecir los rendimientos agrícolas, un índice hídrico definido a partir de los principios conceptuales de los modelos Cropwat y AquaCrop desarrollados por la Organización para la alimentación y la agricultura (FAO) para explicar los efectos de las condiciones hídricas del suelo en los rendimientos de los cultivos. Este índice hídrico se asoció con un índice de la radiación solar neta recibida por el cultivo y con un índice de los “Grados – Día” o temperaturas de desarrollo activo acumuladas a lo largo del ciclo de vida de cada cultivo.

I. Bases conceptuales del modelo desarrollado

A. Pérdidas de rendimiento por efecto del déficit hídrico según CropWat

CropWat es un programa de computador desarrollado por la FAO (1994, 1998, 2007) para optimizar el uso del agua en la agricultura y para estimar disminuciones en rendimientos agrícolas a través de la determinación de balances hídricos de cultivos y pasturas. Una de las ventajas de este software es que estima las necesidades hídricas agrícolas a través de la integración de la evapotranspiración de referencia (ET_o), calculada por el método de Penman-Monteith (1), y un coeficiente de consumo hídrico (K_c) que depende del tipo de cultivo y de su estado de desarrollo.

La ET_o representa la evapotranspiración de una superficie sembrada con un cultivo hipotético o de referencia, que se puede asociar con una pastura, que tiene condiciones de altura, albedo y resistencia superficial estandarizadas y que no tiene limitaciones por estrés hídrico.

La ET_o se estima a través de la siguiente fórmula:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0_{T_{hr}} - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹], R_n es la radiación neta en la superficie de referencia [MJ m⁻² día⁻¹], G es la densidad del flujo del calor del suelo [MJ m⁻² día⁻¹], T_{hr} es la temperatura media del aire diaria [°C], Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor en T_{hr} [kPa °C⁻¹], γ es la constante psicrométrica [kPa °C⁻¹],

$e^{\circ}(T_{hr})$ es la presión de saturación de vapor a temperatura del aire T_{hr} [kPa], e_a es el promedio diario de la presión real de vapor [kPa], u_2 es el promedio diario de la velocidad del viento [m s⁻¹].

La importancia de tener un buen dato de ETo radica en que las necesidades de agua de los cultivos están directamente relacionadas con este parámetro climático. En CropWat la ETo se calcula a partir de variables climáticas como temperaturas mínima media y máxima media, humedad relativa media, velocidad del viento y brillo solar.

A su vez, el descenso en los rendimientos agrícolas por disminución en la precipitación, expresado como la disminución porcentual con respecto a la productividad potencial, calculada en (2), depende del balance Precipitación – Evapotranspiración, de la fenología del cultivo y la capacidad que tiene el suelo de acumular agua.

$$\left\{ \frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right\} = Ky \left\{ \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right\} \quad (2)$$

Donde Y_x y Y_a son los rendimientos máximos y actuales, ET_x y ET_a son las evapotranspiraciones máximas y actuales y Ky es el factor de proporcionalidad entre la reducción relativa de rendimientos y reducción relativa de Evapotranspiración.

El rendimiento máximo depende de la capacidad del suelo de ofrecer agua para que el cultivo transpire a una tasa óptima y de los estados fenológicos del cultivo, lo cual regula la evapotranspiración actual o real del cultivo (ET_a). La reducción en los rendimientos está dada por las condiciones de ET_a (3).

$$ET_a = ET_x - (ET_x - H_2O) \quad (3)$$

Donde H_2O es el agua del suelo que está disponible para la planta, generalmente calculada con base en la diferencia entre Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

Con base en (2) y (3) se calcula la reducción en el rendimiento con base en (4); la cual tiene una restricción cuando el agua disponible en el suelo supera la evapotranspiración máxima posible (zonas lluviosas).

$$\left\{ -\frac{Y_a}{Y_x} \right\} = \left\{ \frac{H_2O}{ET_x} \right\} \quad (4)$$

Lo cual puede ser expresado en porcentaje, de tal forma que una reducción en el agua disponible en el suelo, que depende de la cantidad de lluvia de una región y del tipo de suelo, representa una reducción porcentual del rendimiento máximo potencial.

B. La producción primaria neta como función de la transpiración en AquaCrop

AquaCrop es un modelo de cultivo desarrollado recientemente por la FAO para determinar el efecto hídrico (déficit y exceso) sobre los rendimientos de los cultivos. La base de AquaCrop implica que la productividad agrícola (expresada como biomasa) está dada por la transpiración real o utilización de agua por la planta, lo que Steduto y otros (2009), simplificaron en AquaCrop 3.0 (2009) mediante (5).

$$B = WP \cdot \Sigma Ta \quad (5)$$

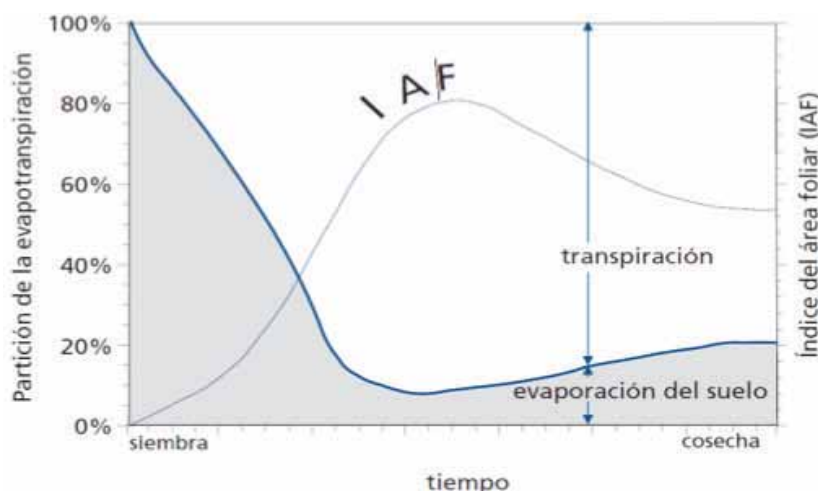
Donde ΣTa es la transpiración del cultivo durante todo el ciclo, WP es un parámetro de productividad hídrica que tiene que ver con la capacidad del cultivo para generar biomasa como una función de la transpiración (Kg de biomasa por m² y por mm de agua transpirada acumulada durante el ciclo de cultivo) y B es la Biomasa Total. Esta biomasa, que muestra la Productividad Primaria Neta (PPN), se determina finalmente como el producto de WP por la transpiración y por un índice que expresa la proporción existente entre la biomasa “útil” del cultivo y la biomasa total, llamado Índice de Cosecha (HI).

El rendimiento agrícola probable se expresa finalmente en términos de masa de producto por unidad de área cosechada en la planta (6).

$$B = \{WP \cdot \Sigma Ta\} HI \quad (6)$$

En este caso la transpiración se calcula como una función del Índice de Área Foliar (IAF), el cual está ligado al crecimiento del dosel del cultivo (Capacidad de Campo), y la relación existente entre éste y la evaporación y la transpiración (véase gráfico 1).

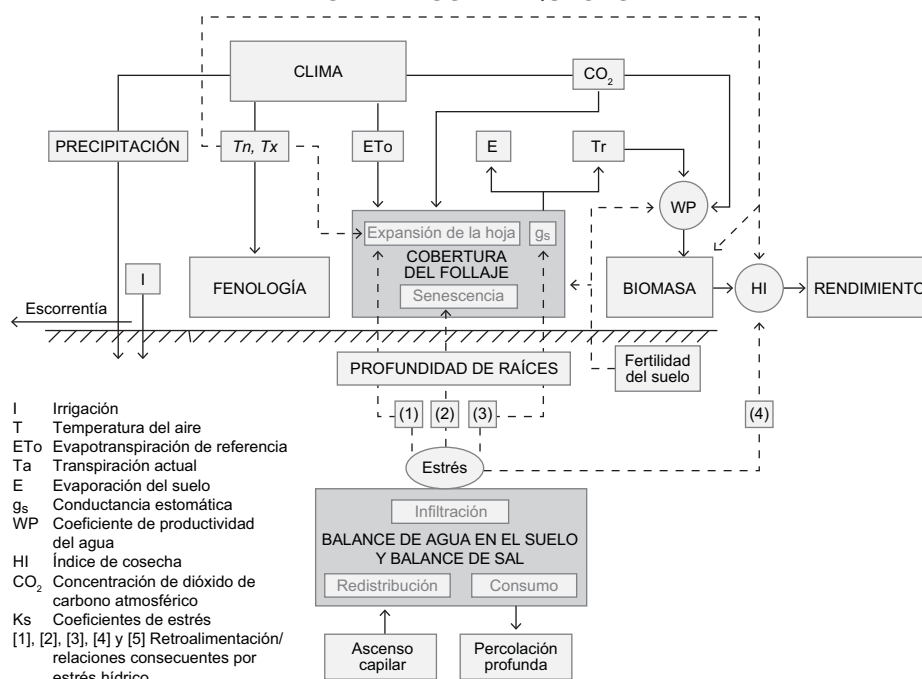
GRÁFICO 1
RELACIÓN ENTRE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR, EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN
(En porcentajes)



Fuente: FAO, 2006.

En la siguiente figura se aprecia el diagrama de flujo de los procesos edáficos, fenológicos, fisiológicos y climáticos simulados en Aquacrop, que conducen a la estimación del rendimiento del cultivo analizado.

GRÁFICO 2
DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS COMPONENTES SUELO-CLIMA-PLANTA,
MODELADOS EN AQUACROP



Fuente: FAO, 2009.

C. La radiación neta (Rn) como motor del movimiento de agua en la planta

El flujo de radiación neta (Rn) representa el balance de energía de onda corta (0,15 a 3 μm) y onda larga (3 a 100 μm) que tiene disponible una cubierta vegetal para realizar su actividad fotosintética básica y para la transferencia de agua desde el suelo a la atmósfera. La radiación neta se puede estimar como la radiación solar total o global menos el albedo o radiación de onda corta reflejada por la superficie agrícola.

Esta variable puede ser medida directamente usando un radiómetro neto, o bien realizando una estimación de su valor, a través de modelos que integran las variables que componen el balance de energía de onda larga y onda corta (Ortega-Farias y otros, 2004).

En el caso de la radiación de onda corta, se ha encontrado que entre 20 y 25% de la radiación solar, que es la principal variable de entrada de los modelos de Rn, es reflejada a la atmósfera por la cubierta vegetal (Jensen y otros, 1990). El flujo de Rn o energía disponible es la fuerza principal que determina, en mayor medida, las pérdidas de agua de una cubierta vegetal cuando el agua en el suelo no es limitante. Por esta razón, el flujo de Rn es la principal variable de entrada en el modelo de Penman-Monteith (1) y puede llegar a representar entre un 50 y 60% de la evapotranspiración real en climas húmedos y subhúmedos, respectivamente (Jensen y otros, 1990).

D. El efecto de la temperatura sobre las especies vegetales

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos, principalmente de los poiquiloterms (plantas), que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado en su ciclo de vida a otro. La medida de este calor acumulado se conoce como Tiempo Fisiológico, y teóricamente este concepto que involucra la combinación adecuada de grados de temperatura y el tiempo cronológico, es siempre el mismo (WMO, 1993).

En términos generales, debajo de una temperatura umbral mínima y regulada genéticamente para cada organismo, el desarrollo no ocurre o es insignificante. Sobre dicha temperatura, el desarrollo se incrementa hasta llegar a un pico o intervalo, donde la velocidad del desarrollo es máxima. A partir de este valor, el desarrollo decrece nuevamente hasta llegar a ser nulo en una temperatura umbral máxima. Estos valores se conocen como Temperaturas Umbrales.

La acumulación de grados día (GDD o GDC) puede determinar el grado de adaptación (confort) que tiene una especie ubicada en un lugar dado, lo cual puede limitar sus rendimientos.

II. Información y metodología utilizada

A. Información climática

Para el desarrollo del modelo agroclimático objeto de este trabajo, se utilizó información mensual de temperaturas (máxima media y mínima media), humedad relativa media y brillo solar de los últimos 6 años, provenientes de estaciones meteorológicas de los municipios listados en el cuadro 1. Se usó este período de 6 años en razón a que este es el mismo período para el cual se obtuvieron datos de rendimientos históricos de los cultivos involucrados.

CUADRO 1
MUNICIPIOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS

Municipio	Departamento	Sistema productivo
La Unión	Valle	Maíz
Tuluá	Valle	Maíz
Buga	Valle	Maíz
Ciénaga de Oro	Córdoba	Maíz
Cereté	Córdoba	Maíz
Tuquerres	Nariño	Papa
Aldana	Nariño	Papa
Samacá	Boyacá	Papa
Sogamoso	Boyacá	Papa
Tenjo	Cundinamarca	Papa
Mosquera	Cundinamarca	Papa

Fuente: Elaboración propia.

B. Información agrícola

Se usó la información de rendimientos a escala municipal proveniente de la Corporación Colombia Internacional (CCI) (2004 B, 2005 A y 2008 A); así como el consolidado de las evaluaciones agrícolas departamentales, publicadas en las páginas web de las gobernaciones, que tienen información municipal de rendimientos agrícolas de los principales productos, detallada para los semestres agrícolas de los últimos años (2002-2008).

C. Generación de datos de radiación solar

Se generó la radiación solar global (R_s) a partir de los datos de brillo solar (insolación) de las estaciones meteorológicas involucradas en el estudio. Para ello se utilizó CropWat, que utiliza la fórmula de Angstrom (7) para relacionar estas dos variables.

$$R_s = \left[a_s + b_s \frac{n}{N} \right] R_a \quad (7)$$

Donde R_s es la radiación solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$], n es la duración real de la insolación [horas], N es la duración máxima posible de la insolación [horas], R_a es la radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$], a_s es la constante de regresión, que expresa la fracción de radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$), $a_s + b_s$ es la fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

Se obtuvo luego la radiación solar neta, es decir, la radiación de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada mediante (8).

$$R_n = [1 - \alpha] R_s \quad (8)$$

Donde R_n es la radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$], α es el albedo o coeficiente de reflexión del cultivo¹, que oscila entre 0,20 y 0,25 según el cultivo, R_s es la radiación solar entrante [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]. En otras palabras, R_n puede considerarse como la cantidad de energía disponible para el cultivo después de la pérdida por reflexión.

D. Generación de evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración actual (ET_a)

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde desde una superficie cultivada; desde la superficie del suelo por evaporación y desde el cultivo por transpiración. En ese sentido, éste es un parámetro que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo (tipo de suelo), del tipo de planta y su estado de salud (sanidad) y del clima.

Si se estandariza el tipo de suelo, asumiendo que la planta no está sometida a estrés hídrico (suelo a capacidad de campo constante) y se asume un cultivo hipotético² (pasto, con una altura de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23) la evapotranspiración dependerá únicamente del clima y a esto lo llamamos evapotranspiración de referencia (ET_o), la cual cuantifica el poder desecante de la atmósfera. Se halló la ET_o a escala mensual por medio de (1), utilizando CropWat 8.0.

La ET_a se generó mediante este mismo software, utilizando los coeficientes K_c sugeridos por el programa. Los datos de entrada fueron los datos climáticos a escala mensual mencionados en 2.1; sin

¹ El albedo de un cultivo depende del color de las hojas, distribución, estructura e índice de área foliar (porción de suelo cubierta por la vegetación); por lo que se entiende que éste varía temporalmente y depende del estado sanitario del cultivo; no obstante se considera que el cultivo del maíz tiene un albedo de entre 0,21 y 0,23 (0,22), mientras que el de la papa oscila entre 0,20 y 0,25 (0,23).

² La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo.

embargo, vale la pena aclarar que como el software requiere el dato de velocidad media mensual del viento a 2 m de altura y este dato no es medido en la mayoría de estaciones seleccionadas, se utilizó 2 m.s⁻¹ como dato constante en cada mes.

E. Generación del tiempo fisiológico

En organismos poiquiloterms, como insectos y plantas, la temperatura desempeña un papel importante en el desarrollo de los mismos, de tal modo que el tiempo cronológico de su desarrollo se incrementa cuando esta es baja y aumenta en caso contrario.

Las unidades de tiempo fisiológico se expresan en grados día (GD en la ecuación 9) y corresponden a unidades del tiempo fisiológico que determinan el paso de una etapa fenológica a otra hasta completar el ciclo de vida. En ese sentido, las plantas requieren una cantidad de grados día para ir desde siembra hasta cosecha. Podría pensarse que, obviando los efectos fisiológicos de las altas temperaturas sobre las plantas tropicales, el grado de adaptación de una especie vegetal a un sitio está determinado por la capacidad que tiene de acumular grados día en un tiempo cronológico dado. En este caso, los grados día se determinaron con la ecuación (9) y los umbrales fueron tomados de EcoCrop (FAO, 2000), aunque en este caso sólo se trabajó con la temperatura base (umbral mínimo).

$$GD = \left\{ \left[\frac{TM+Tm}{2} \right] - UM \right\} \cdot NC \quad (9)$$

Donde GD es el tiempo fisiológico invertido en el periodo cronológico que va de siembra a cosecha, TM es la temperatura máxima media del ciclo de cultivo, Tm es la temperatura mínima media del periodo de cultivo, UM es la temperatura base y NC es el número de días del ciclo de cultivo.

III. Calibración de la ecuación para determinar rendimientos actuales de maíz y papa

Se generó una ecuación base de predicción de rendimientos agrícolas para dos cultivos analizados en primera instancia (papa y maíz) en la que se tienen en cuenta los parámetros de evapotranspiración actual, radiación solar neta y temperatura. La evapotranspiración de referencia se utilizó dentro de la ecuación para estimar la productividad primaria neta y obtener un rendimiento probable al incorporar el Índice de Cosecha (IC), es decir partiendo de (6) se generó (10) cambiando el valor de transpiración original de esta fórmula por el de ETa.

$$Ym = (\Sigma ETa * WP) * IC \quad (10)$$

Donde Ym es el rendimiento probable de la especie en análisis en función de la disponibilidad hídrica, ΣETa es la evapotranspiración actual acumulada de un cultivo desde siembra hasta cosecha, WP³ es el factor de productividad de agua e IC⁴ es el índice de cosecha.

La ecuación original involucrada en Aquacrop fue modificada, con la inclusión de dos factores para dar mayor precisión al cálculo deseado. Un factor está relacionado con la energía disponible en el sistema de cultivo, representado por la radiación neta (8) y otro se relaciona con el grado de adaptación del cultivo al ambiente, expresado como la acumulación de grados día durante el ciclo promedio de cada cultivo (9). En ese sentido, la ecuación base queda expresada como aparece en (11).

³ Se asumió que el factor de productividad de agua (WP) de maíz es de 33,7 g.m-2 y que el de papa es de 16 g.m-2 (FAO, 2009).

⁴ Se asumió que el HI de maíz es de 48% y que el de papa es de 70%.

$$Rdto_x = \{X_1 \cdot Ym\} + \{X_2 \cdot Rn\} + \{X_3 \cdot GD\} \quad (11)$$

Donde $Rdto_x$ es el rendimiento de una especie expresado en $Kg.ha^{-1}$, X_1 , X_2 y X_3 son coeficientes hallados con base en análisis de regresión múltiple.

Esta técnica se utilizó para relacionar las tres variables involucradas (Ym , Rd y GD), determinadas para cada semestre productivo en cada zona productiva representativa (semestres A y B agrícolas), con los rendimientos obtenidos a nivel municipal, reportados por las fuentes mencionadas en el apartado I.B. La producción primaria neta como función de la transpiración en AquaCrop.

IV. Resultados

Los índices calculados (Y_m , R_n y GD) y los rendimientos ($Kg.ha^{-1}$) obtenidos a nivel municipal, departamentos de Valle del Cauca (caso maíz) y Cundinamarca, Boyacá y Nariño (caso papa), aparecen en el cuadro 2. Debido a que el nivel municipal aun es muy grueso para los análisis, se utilizaron los últimos rendimientos semestrales suministrados por cada fuente; de esa forma se pretende filtrar el ruido que se podría involucrar por el uso de datos de hace varios años, ya que se estarían involucrando cambios tecnológicos⁵.

CUADRO 2
DATOS DE RENDIMIENTOS REALES E ÍNDICES
CALCULADOS PARA CADA PERÍODO

A. Maíz				
Municipio	Rendimiento probable (Y_m)	Radiación neta R_n	Grados día (GD)	Rendimiento (R_{dto})
La Unión	4 149,1	12,3	2 006,3	5 500
La Unión	3 746,4	10,9	1 968,8	5 500
Tuluá	4 825,3	12,0	1 756,3	5 900
Tuluá	4 770,3	12,1	1 785,6	5 900
Tuluá	5 032,4	12,4	1 718,8	6 000
Tuluá	4 993,5	12,2	1 743,8	6 000
Buga	5 300,9	12,6	1 662,5	6 000
Buga	5 228,1	12,9	1 756,3	6 000
La Unión	4 099,0	11,7	1 975,0	5 500
La Unión	3 788,4	11,6	1 968,8	5 800
Buga	4 894,9	12,3	2 068,8	5 600
Buga	4 991,9	12,7	2 043,8	6 100

⁵ Los datos de rendimientos de papa fueron analizados con los expertos de Corpoica (Dra A. Cerón) para determinar la veracidad de los mismos (muchos fueron rechazados).

Cuadro 2 (conclusión)

Municipio	Rendimiento probable (Ym)	Radiación neta Rn	Grados día (GD)	Rendimiento (Rdto)
Cienaga	4 005,0	12,0	1 948,0	5 500
Cienaga	4 113,7	12,3	2 097,0	5 500
Cereté	3 897,8	11,9	2 048,7	5 600
Cereté	5 123,0	11,9	1 689,0	6 000
La Unión	4 564,1	13,0	1 975,3	5 500
La Unión	3 834,2	10,0	1 936,7	5 600

B. Papa

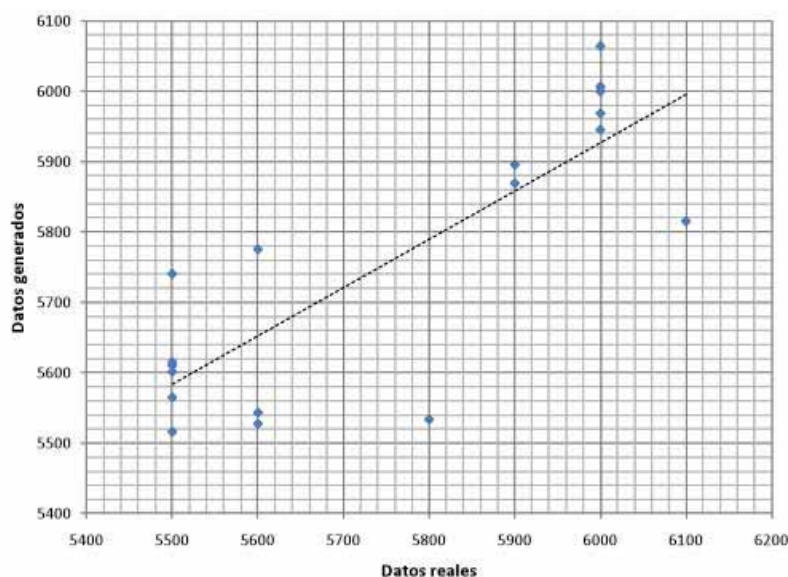
Municipio	Rendimiento probable (Ym)	Radiación neta Rn	Grados día (GD)	Rendimiento (Rdto)
Tuquerres	4 919,0	11,0	1 453,6	19 000
Tuquerres	4 802,6	10,5	1 452,0	21 000
Aldana	5 381,6	12,3	1 423,3	22 000
Aldana	4 911,2	11,2	1 323,0	21 000
Samacá	5 718,7	13,5	1 762,5	18 000
Samacá	5 662,7	12,1	1 803,0	18 000
Sogamoso	6 525,1	13,5	1 853,0	12 000
Sogamoso	6 666,2	13,0	1 917,0	12 000
Tenjo	5 824,0	10,7	1 719,0	22 500
Tenjo	5 880,0	9,2	1 750,5	25 000
Mosquera	6 056,4	11,2	1 776,2	22 000
Mosquera	5 914,3	10,9	1 770,0	21 000

Fuente: Elaboración propia.

A. Modelo predictivo para maíz

$$Rdto_{Maíz} = 5345 + [0.253 \cdot Ym] + [10 \cdot Rn] - [0.450 \cdot GD] \quad (12)$$

GRÁFICO 3
RELACIÓN ENTRE LOS DATOS REALES Y LOS GENERADOS CON LA ECUACIÓN (12)



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación (12) explica (valor R^2) el rendimiento del maíz ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) en un 64,3%, siendo altamente significativo el grado de relación entre los datos generados con el modelo y los datos reales, tal como se observa en el cuadro 3.

CUADRO 3
ANÁLISIS DE VARIANZA CON LA ECUACIÓN (12)

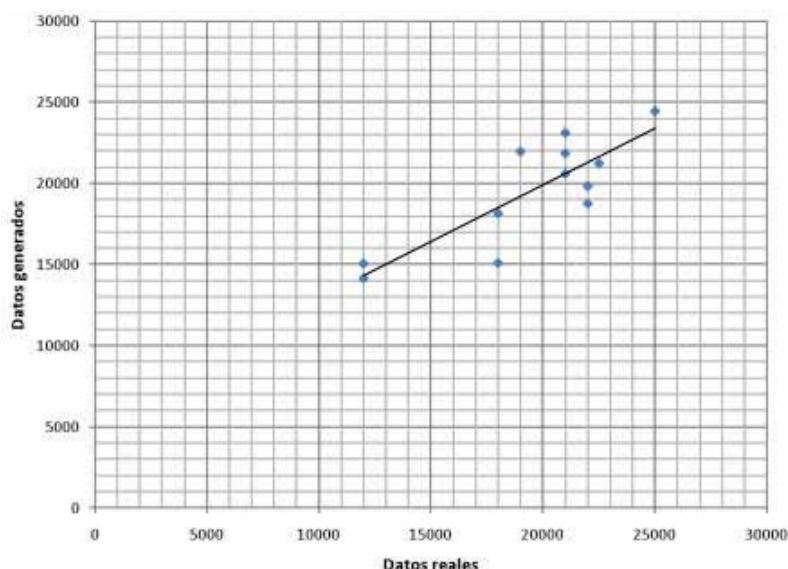
Fuente	GL	MS	F	P-Valor
Regresión	3	197 749	10,0	0,001
Error residual	14	19 729		
Total	17			

Fuente: Elaboración propia.

B. Modelo predictivo para papa

$$Rdto_{papa} = 53169 - [0,720 \cdot Ym] - [2207 \cdot Rn] - [2,41 \cdot GD] \quad (13)$$

GRÁFICO 4
RELACIÓN ENTRE LOS DATOS REALES Y LOS GENERADOS CON LA ECUACIÓN (13)



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación (13) explica (valor R^2) el rendimiento del cultivo de papa en un 58%, siendo altamente significativo el grado de relación entre los datos generados con el modelo y los datos reales, tal como se observa en el cuadro 4.

CUADRO 4
ANÁLISIS DE VARIANZA CON LA ECUACIÓN (13)

Fuente	GL Grados de libertad	MS Cuadrado medio	F Valor de contraste	P-Valor
Regresión	3	40 676 333	6,06	0,019
Error residual	8	6 712 521		
Total	11			

Fuente: Elaboración propia.

V. Conclusiones

Se utilizaron las bases conceptuales de los programas de FAO Cropwat y Aquacrop para generar ecuaciones de estimación de los rendimientos semestrales de los cultivos de papa y maíz con resultados positivos, aceptables estadísticamente. No obstante, son ecuaciones empíricas cuya validez se circunscribe a los sectores para los cuales se desarrollaron: Valle del Cauca en el caso maíz y altiplanos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño (caso papa).

Se obtuvieron ecuaciones predictivas del rendimiento para los cultivos de papa y maíz, siendo similar la estructura de éstas. No obstante, la ecuación obtenida para hallar los rendimientos de papa tiene casi todos los términos con signos negativos (relación inversa), mientras que la obtenida para maíz tiene casi todos los términos positivos (relación directa).

Esta diferencia está relacionada con la respuesta fotosintética de cada una de estas plantas a las condiciones ambientales. El maíz, por ser una planta C4, tiene un sistema enzimático fotosintético que no está bien adaptado para funcionar a temperaturas inferiores a los 10°C, mientras que las plantas C3, como la papa, mantienen su funcionalidad hasta cerca de 0°C, pero no pueden funcionar a altas temperaturas, razón por la cual en papa los rendimientos pueden verse disminuidos en ambientes que tengan temperaturas más altas que las actuales.

La condición C3 y C4, así como la CAM (condición de metabolismo ácido de las crasúlceas, por su sigla en inglés), son adaptaciones fisiológicas al ambiente, las plantas C4 y CAM están adaptadas a condiciones cálidas y raramente se encuentran en otros ambientes que no sean estos, mientras que las plantas C3 tienen un rango de adaptación de temperatura mucho más amplio.

Sin embargo, es posible que la adaptación a la alta temperatura de dos plantas C3 y C4 adaptadas a un mismo clima sea mayor en la planta C4.

La metodología desarrollada se puede aplicar para otros cultivos y regiones del país, con los ajustes agroclimáticos respectivos, para satisfacer las demandas en la materia del DNP, dentro del Estudio del Impacto Económico del cambio Climático.

VI. Bibliografía

- Allen, R. G., M. Smith, A. Perrier and L. S. Pereira. "An Update for the Definition of Reference Evapotranspiration". ICID Bulletin 1994 vol. 43 No 2.
- Corporación Colombia Internacional. CCI. Datos de producción agrícola en Colombia, años 2004 a 2009. Comunicación personal. Bogotá. FAO (Food and Agriculture Organization) (2009), AquaCrop Reference Manual. <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropChapter2.pdf>
- ____ (2009), AquaCrop Reference Manual. <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropChapter3.pdf>
- ____ (2009), AquaCrop Reference Manual. <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropAnnexes.pdf>
- ____ (2007), Example of the use of CropWat 8.0. <http://www.fao.org/nr/water/docs/CROPWAT8.0Example.pdf>
- ____ (2006), Estudio FAO Riego y Drenaje, N° 56: Evapotranspiración del cultivo, FAO, Roma. 298 p.
- ____ (2000), EcoCrop: Crops climate and soil requirements. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home>
- ____ (1998) Cropwat 4 Windows. Version 4.2. By M. Smith, D. Clarke and K. Al Askari. Rome.
- Jensen, M., R. Burman, , R. Allen, (1990), Evapotranspiration and irrigation water requirements, p.332 Manual and reports on engineers practices N° 70. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, USA.
- Loomis, S., D. Connor, (2002), Crop Ecology: Productivity and management in agricultural systems, Cambridge University Press. p 292-304.
- Montoya, E., y otros, (2009), Boletín Técnico No 33: Modelo para simular la producción potencial del cultivo de café en Colombia. Cenicafe. p.52.
- Ortega-Farías, S. y otros (2004), Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. *Irrig. Sci.* 23:1-9.
- Raes, D., y otros (2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron. J.* 101:438–447.

- Reigosa, M., N.Pedrol, y , A.Sanchez, (2003), La Ecofisiología: Una ciencia de síntesis. Thomson Ed. Madrid. p. 223-286.
- Salisbury F.B. y C.W. Ross (2000), Fisiología de las Plantas. Tomo 2: Bioquímica Vegetal. Ed. Thomson-Paraninfo, 2000.
- Steduto, P. y otros(2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agron. J.* 101:426–437.
- WMO. 1993. CAgM Report No. 52 . Working Group. Report of the RA II Working Group on Agricultural Meteorology. WMO/TD-No. 524, 198 pp.



Serie

CEPAL

medio ambiente y desarrollo

Números publicados

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

147. Desarrollo de una función agroclimática para estimar productividad de los cultivos agrícolas en Colombia. J. Francisco Boshell V. (LC/L.3586), marzo 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
146. Panorama del cambio climático en Colombia. Javier Blanco (LC/L.3585), marzo 2013. Email: carlos.demiguel@cepal.org, erecc.lac@cepal.org.
145. Análisis de la vulnerabilidad del sector hidroeléctrico frente a escenarios futuros de cambio climático en Chile. James McPhee, Eduardo Rubio, Rodrigo Meza, Álvaro Ayala (LC/L.3599), diciembre 2012. Email: erecc.lac@cepal.org.
144. Políticas Fiscales, impactos energéticos y emisiones de CO2 en Chile. Carlos de Miguel, Raúl O’Ryan, Mauricio Pereira y Bruno Carriquiry (LC/L.3434), diciembre 2011. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
143. Financiamiento para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio en un contexto de crisis: Indicadores para Chile. Raúl O’Ryan, Mauricio Pereira y Carlos de Miguel (LC/L.3405), noviembre 2011. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
142. Estimaciones de gasto social en vivienda y desarrollo urbano para algunos países de América Latina y el Caribe. Raquel Szalachman, María Paz Collinao. (LC/L.3169-P) N° de venta: S.09.II.G.142 marzo 2010. Email: Raquel.szalachman@cepal.org.
141. Gasto social en vivienda y desarrollo urbano. Raquel Szalachman, María Paz Collinao. (LC/L.3149-P), N° de venta: S.09.II.G.122, diciembre 2009. Email: Raquel.szalachman@cepal.org.
140. Síndrome holandés, regalías mineras y políticas de gobierno para un país dependiente de recursos naturales: el cobre en Chile. Mauricio Pereira, Andrés Ulloa, Raúl O’Ryan, Carlos de Miguel (LC/L.3139-P), N° de venta: S.09.II.G.112, diciembre 2009. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
139. Desenvolvimento redoviario e o impacto fiscal do sistema de concessões em Brasil. Ana Paula H.Higa (LC/L.3120-P), N° de venta: P.09.II.G.99, octubre 2009. Email: Ricardo.jordan@cepal.org.
138. Trade and Sustainable Development: Spatial Distribution of Trade Policies Impacts on Agriculture. Sergio Ludeña, Andrés Schuschny, Carlos de Miguel y José Durán. (LC/L.3048-P), N° de venta: E.09.II.G.50 (US\$ 10.00), junio 2009. Email: carlos.demiguel@cepal.org.
137. Consideraciones ambientales en torno a los biocombustibles líquidos. José Javier Gómez, Joseluis Samaniego, Mariana Antonissen (LC/L.2915-P), N° de venta: S.07.II.G.49 (US\$ 10.00), julio 2008. Email: jose.gomez@cepal.org.
136. Impactos económicos y sociales de shocks energéticos en Chile: un análisis de equilibrio general. Raúl O’Ryan, Carlos de Miguel, Mauricio Pereira, Camilo Lagos (LC/L.2901-P), N° de venta: S.07.II.G.37 (US\$ 10.00), mayo 2008. Email: carlos.demiguel@cepal.org.

El lector interesado en adquirir números anteriores de esta serie puede solicitarlos dirigiendo su correspondencia a la Unidad de Distribución, CEPAL, Casilla 179-D, Santiago, Chile, Fax (562) 210 2069, correo electrónico: publications@cepal.org.

Nombre:
 Actividad:
 Dirección:
 Código postal, ciudad, país:
 Tel.: Fax: E.mail:

MEDIO AMBIENTE Y
DESARROLLO

147

DESARROLLO

MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Series

C E P A L

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE
ECONOMIC COMMISSION FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN
www.cepal.org